

# 福州地区高承压富水砂层地铁车站深基坑工程降水技术

孙明祥

(中铁南方投资集团有限公司, 518054, 深圳//工程师)

**摘要** 福州地区地层受小流域及海洋条件影响,浅部第四系沉积物变化极大,规律性极不明显。与全国其他城市对比,明挖地铁车站基坑施工过程中遇到软土、富水砂层、孤石时均属较大风险项目<sup>[1]</sup>。以福州地铁5号线两座车站明挖基坑施工为背景,对比分析了这两座车站的深基坑围护结构设计及降水设计。结果表明:通过采取合理降水管控及墙缝注浆等措施,可保障基坑开挖稳定。深基坑及周边环境实时沉降监测结果表明:在两种降水方案条件下,支护结构及周边沉降都可得到很好管控。

**关键词** 福州地铁;富水砂层;高承压水;基坑降水

**中图分类号** T551.4<sup>+</sup>12;U231.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2021.09.036

Group Co., Ltd., 518054, Shenzhen, China

目前,大多数深基坑工程开挖施工均建立在降水的基础上,以保证基坑在干燥、安全的环境中施工<sup>[1-2]</sup>。通过降水,可降低开挖土体含水量,提高土体抗剪切强度,为深基坑开挖提供便利。但在深基坑施工中,基坑底部常受到承压水影响,必要时需进行基坑承压水降水设计。由于各区域的地质及水文条件不同,承压水降水设计理念存在差异,不同的方案在实际使用时也有一定差异。

本文以福州地铁5号线金山路站和金华路车站基坑工程为例,分析了不同工程地质、水文条件及围护结构形式下的高承压富水砂层降水方案、基坑围护结构水平、竖向位移及周边环境沉降变形。根据监测及数据分析得出,在高承压富水砂层条件下,不同围护结构形式的降水方案对深基坑开挖及周边环境都能起到良好的管控效果。

## 1 工程概况

福州地铁5号线起于闽侯县,止于福州南站,其线路主要位于福州市仓山区内。本文重点介绍5号线1标金山区域地层条件下的降水方案设计。该段线路途经荆溪新城站、农林大学站、洪塘路站、金林路站、金华路站、金山站等,长度约8.7 km。

### 1.1 工程地质情况

金山区域地层依次为素填土、粗中砂、淤泥质土、淤泥夹砂、粉细砂、卵石、强风化花岗岩层(砂土状)等,其围护结构通常采用地下连续墙加内支撑形式,墙趾通常位于强风化花岗岩层,不同车站其围护结构也有所不同。本文选择金山站及金华路站进行分析,两站的地质详情分别如图1和图2所示。

## Dewatering Technology of Metro Station Deep Foundation Pit of High Pressure and Rich Water Sand Stratum in Fuzhou Area

SUN Mingxiang

**Abstract** Fuzhou area stratum formation is affected by small watershed and ocean conditions, and the shallow quaternary sediments vary greatly with little regularity. Compared with other cities in China, encountering soft soil, water-rich sand and isolated stone during open excavation of metro station foundation pit construction are all relatively risky<sup>[1]</sup>. Taking foundation pit open excavation construction of two stations along Fuzhou Metro Line 5 as background, deep foundation pit retaining structure design and dewatering design of the two stations are compared and analyzed. Results show that through the adoption of measures such as reasonable dewatering control and cracks grouting, the stability of deep foundation pit excavation is guaranteed. Real-time settlement monitoring results of deep foundation pit and surrounding environment show that under the condition of two dewatering schemes, supporting structure and surrounding settlement are well controlled.

**Key words** Fuzhou metro; water-rich sand stratum; high-pressure confined water; foundation pit dewatering

**Author's address** China Railway Construction Investment

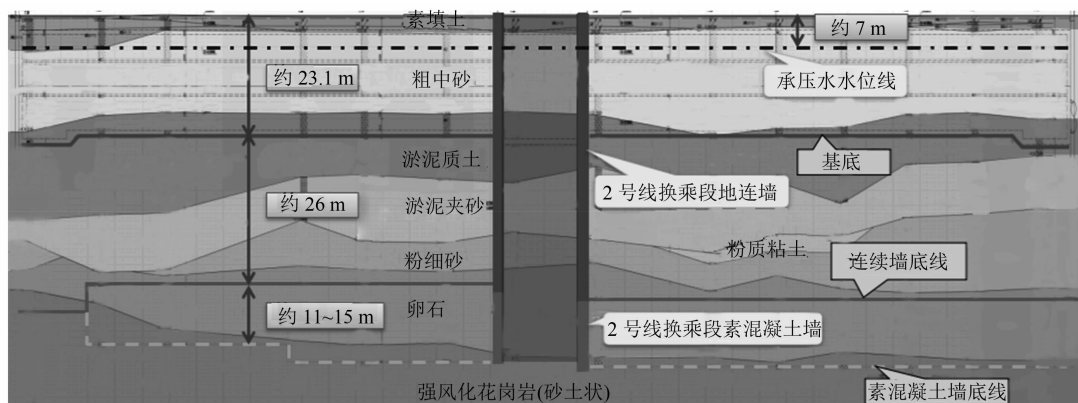


图1 福州地铁5号线金山站地质详情图

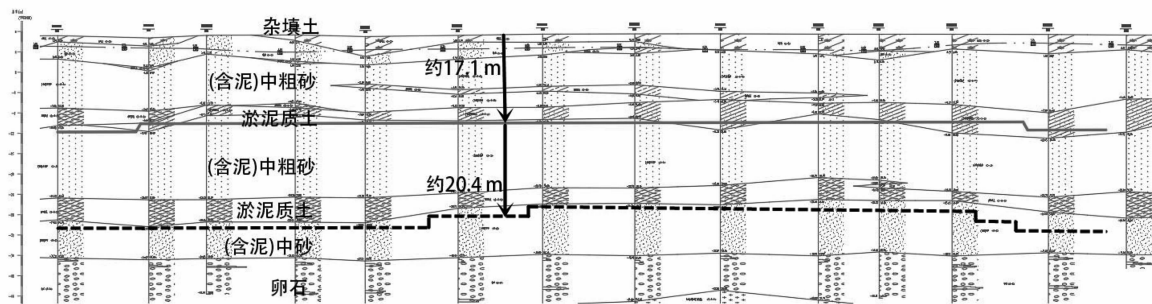


图2 福州地铁5号线金华路站地质详情图

## 1.2 工程水文条件

根据勘察结果,在金山区域内主要有潜水、承压水及基岩裂隙水三类地下水。潜水埋深较浅,水位埋深为 1.5~4.5 m,水位标高为 3.5~6.3 m,主要包含在粉细砂层、粗中砂层中,以淤泥质土作为隔水层;承压水埋深为 7.8 m,水位标高为 0,承压水头约为 29.5~42.9 m,主要包含在粉细砂、中粗砂及卵石层中,以淤泥夹砂层及粉质黏土层作为隔水层;基岩裂隙水主要在深部花岗岩的碎块状强风化及中等风化带中分布,受岩性和地质构造控制及裂隙分布影响,其埋藏、分布及水动力特征非常不均匀,透水性及富水性较弱,具有弱承压性。

## 1.3 明挖车站设计

1) 主体围护结构设计:金山站主体围护结构采用 1 000 mm 厚地下连续墙,工字钢接头。地连墙深度依次打穿粗中砂、淤泥质土、粉细砂、卵石层并进入砂土状强风化花岗岩层 1.5 m。

2) 地下连续墙平均深度约为 66.5 m。金华路站主体围护结构采用 800 mm 厚地下连续墙,工字钢接头。地连墙深度按依次打穿杂填土、(含泥)粗中砂、淤泥质土、(含泥)粗中砂、淤泥质土层并进入(含泥)中砂 0.8~1.9 m 进行设计,地下连续墙平均

深度约为 37.4 m。

3) 围护支撑体系:金山站标准段采用二道混凝土支撑(一道、三道)、三道  $\phi$  800 mm 钢支撑(二道、四道、五道)加一道换撑  $\phi$  609 mm。金华路站标准段采用四道内支撑,第一道支撑位钢筋混凝土支撑,间距为 9 m;第二道支撑为  $\phi$  800 mm 钢支撑,第三、第四道支撑为  $\phi$  609 mm 钢支撑,间距均为 3 m。

## 2 基坑降水重点、难点对比分析

### 2.1 降水隔断性质

金山站地下连续墙深度达 66.5 m,已经直达强风化花岗岩层。根据围护资料查看,理论上已经将承压水完全隔断,只需保证地下连续墙施工质量及墙缝处施工质量即可。但围护止水效果存在不确定性,若出现渗漏,易在坑内外巨大水头差下,造成管涌、坑外沉降、基坑失稳等,为保障安全性,需要对基坑内进行减压降水。

金华路站地下连续墙深入淤泥质土层并部分进入(含泥)中砂层。隧道淤泥质土层渗透性差,可作为相对隔水层,但是由于其厚度过薄,仅 2.1~3.5 m 厚,在高承压水条件下,极易出现击穿薄弱隔水层的险情;且由于地下连续墙未深入(含泥)中砂层,

坑内降水基本属于敞开式帷幕降水。

在金华路站基坑开挖过程中,开挖面已经揭穿上层(含泥)中粗砂承压含水层,需考虑其同潜水一同处理;且由于下部的敞开式帷幕降水形式,其后期的降压井降水运行过程中的风险较大。

## 2.2 承压水降水

对于金山区域内的基坑,都是在高压承压水条件下的降水设计。两站的不同之处在于:对于金山站,施工中投入了较大人力物力进行了大深度的地下连续墙施工,由于地下连续墙深入隔水层,因此仅需保证地下连续墙的施工质量及墙缝间施工质量即可;对于后续的承压水降水,主要是针对工程施工层面,是在难以完全保证地下连续墙下部施工质量的完整性情况下而设计的降水井,同时为了减少基坑开挖时基底隆起突涌风险。而对于金华路站,通过减少地下连续墙的深度(仅为金山站地下连续墙深度的一半),大大减小了施工成本;但由于降水形式采用敞开式帷幕降水,因此大大提升了对降水井质量要求及后续降水井管控要求。

## 3 基坑降水设计技术思路对比分析

1) 金山站的主体围护结构相对深且厚,达 66.5 m 深、1.0 m 厚,且墙趾位于强风化花岗岩层,持力层稳定;而金华路站的主体围护结构相对浅且薄,仅 37.4 m 深、0.8 m 厚,墙趾主要位于(含泥)中砂层中,底部持力层不稳定。

2) 地下连续墙设计形式不一致直接导致了降水形式的差别。金山站的主体围护结构完全隔断了外部水来源,进行降水时,可直接采用封闭式降水;金华路站的主体围护结构墙趾位于承压水层中,且相对隔水层厚度较薄,为敞开式降水。

3) 不同深度的降水井,采用的降水思路不同,现场管控形式也不同。

## 4 基坑降水设计

### 4.1 疏干井设计

对于围护结构的明挖施工,需要及时疏干开挖范围内的重力水含量,保证基坑开挖过程中土体的干燥,因此均需布设若干疏干井。在浅层疏干降水时,按照有效抽水面积进行计算。由于疏干井具有普遍性与形式一致性,对于数量及形式在此就不进行对比,仅对高压承压水降压井进行对比说明。

### 4.2 降压井设计

#### 4.2.1 降水渗流模型及依据

根据止水帷幕与含水层之间的空间关系,可将基坑降水渗流的形式分为封闭式、敞开式及悬挂式等三种降水。封闭式降水为止水帷幕深入含水层并直达隔水层,将含水层完全隔绝;敞开式降水为止水帷幕深入含水层并未将含水层隔断,但底板在(半)隔水层之上;悬挂式降水为止水帷幕深入含水层并未将含水层隔断,且底板揭穿隔水层<sup>[4]</sup>。

对于金山站,由于止水帷幕将基坑完整包围,基本属于封闭式降水,降水时的难度主要体现在基坑抗突涌稳定性上;对于金华路站,减压降水形式基本属第二类敞开式降水渗流模型,其难度在于整个基坑开挖过程中对于降水井的保护及管控。

#### 4.2.2 基坑抗突涌稳定性验算

基坑开挖过程中,由于承压水上覆土层不断减小,当上覆土压力小于承压水层顶托力后,基坑底将产生隆起,严重时发生基坑突涌<sup>[5-6]</sup>。通常采用式(1)进行稳定性验算。

$$\frac{P_s}{P_w} = \frac{\sum h_i \gamma_{si}}{H \gamma_w} \geq F_s \quad (1)$$

式中:

$P_s$ ——承压含水层顶面至基底面之间的上覆土压力, kPa;

$P_w$ ——初始状态下(未减压降水时)承压水的顶托力, kPa;

$h_i$ ——承压含水层顶面至基底面间各土层的厚度, m;

$\gamma_{si}$ ——承压含水层顶面至基底面间各分层土层的重度, kN/m<sup>3</sup>;

$H$ ——高于承压含水层顶面的承压水头高度, m;

$\gamma_w$ ——水的重度,工程上一般取 10 kN/m<sup>3</sup>;

$F_s$ ——安全系数,根据规范本工程取 1.10。

对于金山站而言,基坑开挖深度约为 23 m,承压水顶面埋深约为 38 m,根据式(1)计算结果,其基坑稳定性明显不满足抗突涌验算要求;若取安全系数为 1.1,则车站减压降水临界开挖深度约为 18 m,通过减压降水涌水量计算的减压井数目约为 23 口。金山站减压降水临界深度、降压井信息分别如下表 1、表 2 所示。

表 1 福州地铁 5 号线金山站降压降水临界深度

单位:m					
开挖区域	钻孔编号	含水层顶板埋深	临界开挖深度	基坑开挖深度	需水头降深
北侧基坑	MEZ3-JS-13	38.9	19.4	22.9	4.5
南侧基坑	M2CZ-NB-12	37.0	18.6	23.1	5.5

表 2 福州地铁 5 号线金山站降压井信息统计表

降水井类型	位置	数量/口	孔径/mm	井径/mm	滤管位置/m	井深/m
减压降水深井	北侧区域	2	650	273	50~59	60
		1	650	273	47~59	60
		3	650	273	44~56	57
	南侧区域	3	650	273	44~56	57
		2	650	273	50~59	60
承压水观测井	坑外	8	650	273	44~56	57

4.2.3 地下水渗流模型计算

通过渗流模型求解地下水在多孔介质中的流动,采用渗流连续性方程及其定解对三维非稳定渗流规律进行模拟计算。根据勘察报告中的地质水文条件建立的模型,其计算结果为:在敞开式降水条件下,取 1.10 的安全系数,坑内(含泥)中砂承压含水层水位需满足降深 3.88~4.25 m 的需求。

根据计算结果,设置降压井时,其深度一方面需要考虑降压井的水头损失(即井损),另一方面需考虑到抽水至观测井之间的水力梯度漏斗可达到的安全水位。考虑到地层性质、围护深度特点及降压幅度要求,金华路站降压井主要布置于坑外,主体基坑需要布设 10 口降水井;按照观测兼备用井数量不小于降水井总数的 20%(且不少于 1 口)要求,坑内共布设 3 口观测兼备用井;各类降压井总计 13 口,井深均为 43 m。降压井信息如表 3 所示。

表 3 福州地铁 5 号线金华路站降压井信息统计表

工程部位	项目名称	编号	数量/口	深度/m	井管直径/mm
坑内	观测兼备用井	YGB1—YGB3	3	43	273
	(含泥)中砂层降压井	Y1—Y10	10	43	273
坑外	水位观测兼备用井	G1—G10	10	29	219
	水位观测兼应急回灌井	HG1—HG5	5	29	273

5 基坑降水的主要技术管控措施

5.1 主体围护结构处的墙缝注浆止水

金山站和金华路站地下存在高承压含水层,在其基坑内部施工过程中降水,对于围护结构的密闭性要求较高。在基坑开挖过程中,为防止主体围护

结构的渗漏及涌水涌沙,需提高主体围护结构的墙缝止水效果。

在基坑开挖前,对金山站主体围护结构存在渗漏风险的墙缝,采用 WSS(无收缩后退式注浆)注浆进行注浆止水,注浆深度为 27 m,注浆范围自基底 10 m 到地面下 5 m。在金华路站,采用 2 根  $\phi$  800 mm@600 mm 三重管高压旋喷桩对墙缝处进行止水,并在基坑开挖过程中通过探缝等强制措施防止出现涌水涌砂等现象,对于高压旋喷桩效果不足位置进行 WSS 注浆补强。图 3 为金华路站高压旋喷桩平面图。

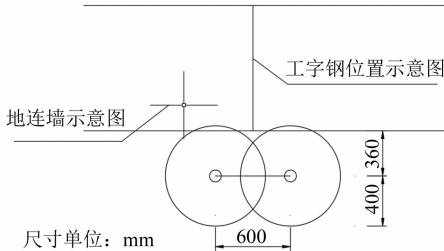


图 3 福州地铁 5 号线金华路站高压旋喷桩平面图

5.2 现场管控

- 1) 土方开挖:土方开挖过程中,严格执行“开槽支撑、先撑后挖、分层开挖、严禁超挖”的要求。
- 2) 墙缝处探挖:通过现场严格管控土方开挖过程中墙缝处的探挖,在每层土方开挖前先对地下连续墙接缝处进行探挖,查看墙缝处土体含水率是否正常,保证墙缝处未出现渗漏。
- 3) 强化降水井管理:基坑施工过程中,对降水井进行全天候倒班制监测管理,强化管理人员对于降水井重要性意识观念,确保降水过程中降水井的正常使用。在现场设置备用库房,保证降水设施出现问题后能够及时进行更换。
- 4) 降水技术管控:金山站地下连续墙深入强风化花岗岩层,已隔断坑内外水力联系,理论上坑内的抽水降压对坑外影响可忽略不计。但实际降水过程中,仍要对管线、建筑物、地下连续墙等进行监控量测,严格控制沉降速率及累计沉降量。降水过程中应严格参照下列原则进行管控:按照降水范围宜小不宜大、时间宜短不宜长、深度宜浅不宜深的原则进行降水;尽量减少开挖时长,缩短降水周期,减少对周围环境的影响;随挖随降,按需降水,逐步降低承压水头,避免过早降压;设置智能监测系统,实时跟踪管控;在周边敏感建筑物附近进行场地协调,布设应急回灌井,防止出现地面沉降等不良影响;基坑开挖过程中,若发生突涌,及时采取封堵措

施,同时应避免降水加剧坑外路面及周边建筑物沉降。

## 6 施工效果分析

### 6.1 沉降变形情况

深部降压引起的地面沉降包括瞬时沉降、固结沉降、土体流变引起的次固结沉降三部分。由于次固结沉降作用时间较长,在计算中主要考虑主固结沉降,并按照分层总和法进行计算管控。相关计算公式参阅文献[7-8]。

根据测算,金山站和金华路站不同施工阶段减压降水引起的坑外地面沉降最大预估值约为 5.7 mm 和 13.5 mm。

根据监测项目控制值要求,各监测项目控制值如表 4 所示。

表 4 地铁车站基坑施工监测项目控制值			
监测对象	监测项目	累计变形控制值	变化速率控制值
基坑支护结构和周围岩土体监测项目	支护墙顶水平位移	±30 mm	±3.0 mm/d
	支护墙顶竖向位移	±30 mm	±3.0 mm/d
	支护墙体水平位移	±30 mm	±3.0 mm/d
	支撑轴力	0.7 $f$	
	立柱结构竖向位移(沉降、隆起)	±20 mm	±2.0 mm/d
	立柱结构水平位移	±20 mm	±2.0 mm/d
	地表沉降	±30 mm	±3.0 mm/d
	地下水位(坑外水位)	±1 000 mm	±500 mm/d
周边环境	地下管线竖向位移及差异沉降	沉降变形累计绝对值控制值±30 mm、差异±2.0 mm/d 沉降 0.25% $L_g$	
	建筑物沉降	±20 mm	±2 mm/d
	建筑物倾斜	倾斜控制值 0.2% $L$	0.1 $H$ /1 000

注:  $f$  为轴力设计控制值;  $L_g$  为差异沉降两点间距离;  $L$  为倾斜监测点两点间距离长度;  $H$  为建构筑物高度。

根据实际检测情况来看,自 2018 年 10 月金山站基坑开挖以来,至 2019 年 7 月结构封顶,基坑外侧最大总沉降为 38 mm,主体围护结构墙顶竖向位移为 4.2 mm,地表沉降为 25.5 mm;金华路站自 2018 年 12 月基坑开挖以来,至 2019 年 8 月结构封顶,基坑外侧最大总沉降为 24.4 mm,主体围护结构墙顶竖向位移为 17.1 mm,建筑物沉降为 16.4 mm。

根据表 4 和实际检测情况,福州地铁 5 号线金山站和金华路站的基坑工程,由于设计的合理和管控到位,两站的整体围护结构变形情况及降压引起的外部周边环境影响较小,基本符合预测。

### 6.2 基坑渗漏情况

在福州地铁 5 号线金山站和金华路站的围护结构施工过程中,采取了以下措施:对工程质量合理管控;通过三重管高压旋喷桩及 WSS 注浆对主体围护结构墙缝进行合理止水;开挖过程中严格执行墙缝探挖制度,及时架设支撑体系;设计合理的降水方案,降水井施工及管控到位。因此,在这两座车站深基坑施工过程中,未出现明显渗漏。

## 7 结论

1) 对于高承压富水砂层中的车站基坑工程,通过主体围护结构、降水、降水井的合理设计、施工管控,以及本文所述的一系列措施,可大大减少主体围护结构、降水井的深度。如:金山站主体围护结构深达 66.5 m,降水井深度约为 60 m,而同样处于高承压富水砂层中的金华路站主体围护结构仅需 37.4 m,降水井深度仅 43 m。若在保证安全质量的前提下,使用敞开式降水,可大大减少围护结构及降水井的造价成本。

2) 车站基坑施工中,对于降水井的管控至关重要,直接影响到基坑开挖的成败。

3) 对于车站基坑降水施工而言,只要采取合理的设计及严格的管控措施,采用敞开式降水甚至悬挂式降水是可行的,可大幅减少地下连续墙及降水井的成本。

## 参考文献

[ 1 ] 郭小帅,石守亮,何建锋,等. 地铁车站基坑降水方案实例[J]. 资源环境与工程, 2019(3): 377.

[ 2 ] 潘世强,邓俊. 富水砂卵石层深基坑近接建筑物安全施工控制技术研究[J]. 公路工程,2018(3): 173.

[ 3 ] 张庆林,詹晨曦,陈晔翔. 福州地铁 1 号线工程特性及地质风险研究[J]. 福建地质,2004(2): 142.

[ 4 ] 王峥. 地铁车站基坑降水设计分析[J]. 中国标准化,2019(8): 99.

[ 5 ] 吴铁华. 考虑渗流作用的基坑抗突涌验算与降深设计[J]. 土工基础,2011(6): 44.

[ 6 ] 何爽. 渗透变形理论在基坑降水中的应用[D]. 武汉:中国地质大学,2008.

[ 7 ] 华南理工大学. 地基及基础[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.

[ 8 ] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1998.

[ 9 ] 李琼. 地铁施工监测及其数据库研究[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2011.

(收稿日期:2019-10-31)